

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	座屈拘束方杖ブレースを有する鋼木質複合構造の設計法に関する研究
氏 名	大越 友樹

1. 序論

環境負荷削減のための対応として建築構造分野では、木質材料を可能な限り多く使用することで森林再生に貢献しようとする試みが模索されている。しかしながら、従来の木質構造では耐荷性能や耐火性能の問題から、4階建て以上に適用することに難があるとされている。このため、木質材料を中低層規模の建物などに適用することを目指した鋼木質複合構造が期待されている。

既往の研究において、鋼と木質材料の複合構造システムの構法成立の可能性(以降、CSTS という)が示されている。この構法では、方杖状に配置した座屈拘束ブレース(以降、BRB という)を用いた損傷制御構造としている。本論文では、中低層建物に適用するCSTSについて、CSTS梁とCLT床の接合部の構造性能を評価し、その設計法を提案する。さらに、提案した設計法に基づき、試設計を行う。

2. CSTS梁・柱部材の構造性能評価

2章では、CSTS梁・柱部材の曲げ実験、短柱圧縮実験、柱梁接合部実験を行っている。CSTS部材は、鋼の周囲に木質材料を取り付けた複合部材とし、鋼においてはリユースを想定して事務所や工場・倉庫に多く使用されている圧延H形鋼を梁に、角形鋼管を柱に用いる。木質材料は、日本の森林に大量に存在するスギの間伐材とする。木質材料どうしは接着剤を用いた接合とする。鋼と木質材料の接合法は環境性や施工性を考慮し、接着剤等の接合材料を用いない、接触しているのみの接合とする。

ここでは、CSTSの梁部材の曲げ実験、柱部材の曲げ実験、柱部材の短柱圧縮実験、柱梁接合部実験をもとに、各部材のモデル化を検討している。梁部材の曲げ実験においては、接着接合、ボルト接合、接触接合とした場合の曲げ性能の比較を行っている。柱部材の曲げ実験においては、鋼材の形状をパラメータとして実験を行い、角形鋼管の場合において十分な部材性能を有していることを確認している。柱部材の短柱圧縮実験においてはCSTS部材の基本的な圧縮性能を把握し、CSTS部材に圧縮力が生じた場合、エンドプレートを通して鋼材だけでなく木質材料も圧縮力を負担できることを示した。CSTSでは柱梁接合部の木質材料の接合が複雑になる場合が多い。そのため、柱梁接合部実験を行い、柱梁接合部では木質材料どうしの応力が伝達されておらず、応力の大部分を鋼材において伝達していることを確認した。

3. CSTS梁とCLT床の接合部の構造性能評価

3章では、CSTSの床にCLTを用いたCSTS梁部材とCLT床の接合部性能を把握するための面内せん断実験を行っている。CSTS梁部材とCLT床の接合にはスタッドを用いる。また、接合部の破壊性状はスタッドが曲げ降伏し、その後CSTS梁部材のボルトの直上部およびCLT床のスタッドの直下部の木質材料部分の支圧破壊となった。

接合部耐力についてはスタッドの設置間隔よりもスタッドの長さにより耐力が増加する。本実験結果とCLT告示の接合法の接合部性能の比較を行い、CLT告示におけるビス接合にスタッドを代用するための設計式を提案した。また、CLT床どうしを接合する場合には、一般的に長ビスやラグスクリューボルトを用いるため、面内せん断実験によ

り、水平構面を検討する際に必要な接合部耐力を示した。

4. CSTS の設計法

4章では、損傷制御構造の設計概念を基本的な枠組みとした設計フローに沿って、2章および3章で行った実験結果をもとに、設計法を提示している。梁・柱部材の実験から曲げ耐力においては鋼材が降伏した時を CSTS 部材の降伏耐力とし、鋼材と木質材料の曲げ耐力の足し合わせにより評価している。降伏耐力と最大曲げ耐力を結んだ線を二次剛性として評価している。また、木質材料の破壊よりも先に鋼が降伏するための条件式を提案している。せん断耐力においては、鋼と木質材料のせん断力の足し合わせにより評価する。圧縮力については、短柱圧縮実験の結果から、鋼材と木質材料のヤング係数比に応じて応力を負担するものとして評価している。

柱梁接合部の応力伝達については、柱梁接合部の実験から、柱梁接合部の応力伝達状態より、木質材料どうしの応力の伝達状態をモデル化している。CSTS 梁部材の端部は鋼材どうしのみを剛接合とした半剛接合とし、回転バネを設けた回転剛性により評価する。

CLT 床を用いた水平構面については、CSTS 梁と CLT 床の接合部の面内せん断実験の結果から、ボルトを用いた場合の必要接合ピッチは 200mm を最大間隔、ボルトの長さ 100mm を最小長さとする。水平構面の評価方法は、CLT 告示に倣い、地震力を負担している各鉛直構面、BRB を用いた鉛直構面どうしの水平せん断耐力の差分を伝達できる面内せん断耐力を有するものとしている。同様に、CLT 床どうしの接合部分が梁上以外の部分で生じた場合には、長ビスまたはラグスクリューボルトを用いるものとし、各接合具のせん断耐力の和が BRB を用いた鉛直構面どうしの水平せん断耐力の差分よりも大きくなるように評価する。

BRB は、鋼モルタル板（溝形鋼にモルタルを充填したもの）を用いた座屈拘束ブレースを用いる。この BRB では、弾性部および接続部に増厚板や補強リブを用いることによって軸剛性を調節することができる。ここでは、BRB の性能に影響を及ぼすパラメータとして、芯材断面、芯材形状（塑性化部、弾性部、接続部）、拘束材に対して設計法を提示している。

また、CSTS 部材のモデル化および設計法に基づき、座屈拘束方杖ブレースを有する 10 層 5 スパンの中層建物の時刻歴応答解析を行い、半剛接合の柱梁接合部のもとで、主架構を弾性域に抑え、座屈拘束ブレースのみを塑性化することを示している。

5. 結論

CSTS 部材の各種の構造実験の結果から、CSTS 柱・梁部材、CSTS 梁と CLT 床の接合部、BRB の各々のモデル化および設計法を提示した。提案した設計法に基づいて試設計を行った。

(様式 17 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院創成科学研究科

報告番号	創科博甲 第 3 号	氏名	大越 友樹
最終試験担当者		主 査 藤田正則	
		審 査 委 員 羽田野袈裟義	
		審 査 委 員 合田 公一	
		審 査 委 員 稲井 栄一	
		審 査 委 員 秋田 知芳	
【論文題目】 座屈拘束方杖ブレースを有する鋼木質複合構造の設計法に関する研究 (Design Method of the Composite Steel-Timber Structure Using Buckling-Restrained Knee Braces)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 環境負荷削減のための対応として建築構造分野では、木質材料を可能な限り多く使用することで森林再生に貢献しようとする試みが模索されている。しかしながら、従来の木質構造では耐荷性能や耐火性能の問題から、4 階建て以上に適用することに難があるとされている。このため、木質材料を中低層規模の建物などに適用することを目指した鋼木質複合構造が期待されている。その構法の一つに、鋼と木質材料の複合構造システム(Composite Steel-Timber Structure, 以降, CSTS という)が提案されており、方杖状に配置した座屈拘束ブレースを用いた損傷制御構造とすることで、柱梁接合部の半剛接合を可能にしている。 本論文は、中低層建物への適用を想定した座屈拘束方杖ブレースを有する CSTS について、各種の構造実験により CSTS 梁・柱部材, CSTS 梁と CLT 床の接合部の構造性能の評価とそれに基づく設計法を提案したもので、鋼木質複合構造の実用化にあたっての有用な知見が得られている。本論文は 5 章で構成されており、各章の内容は下記のとおりである。 第 1 章では、既往の研究を紹介し、本研究の必要性を述べた上で、鋼木質複合構造の技術的な課題について述べている。 第 2 章では、CSTS の梁部材の曲げ実験、柱部材の曲げ実験、柱部材の短柱圧縮実験、柱梁接合部実験をもとに、破壊性状、最大耐力などの構造性能を検討している。CSTS 部材は、鋼の周囲に木質材料を取り付けた複合部材とし、鋼においては工場・倉庫に多く使用されている圧延 H 形鋼を梁に、角形鋼管を柱に用いている。梁部材の曲げ実験においては、接着接合、ボルト接合、接触接合とした場合の曲げ性能の比較を行い、いずれの接合法においても最大耐力以降、鋼の塑性変形能力を有していることを示している。これらの異なる接合法の最大曲げ耐力および初期剛性をもとに、接触接合の CSTS 部材の曲げ耐力および初期剛性を求めるための低減係数を定めている。柱部材の曲げ実験においては、鋼材の形状(十字 H 形鋼, 角形鋼管)をパラメータとした実験を行い、これらの鋼材の場合においても十分な部材性能を有していることを確認している。柱部材の短柱圧縮実験においては CSTS 部材の基本的な圧縮性能を把握し、CSTS 部材に圧縮力が生じた場合、エンドプレートを通じて鋼材だけでなく木質材料も圧縮力を負担できることを示している。CSTS 部材の柱梁接合部実験により、柱梁接合部においては木質材料どうしの応力が伝達されておらず、半剛接合となることを確認している。これらの CSTS 梁・柱部材の破壊性状および復元力特性をもとに、曲げ耐力・初期剛性・二次剛性の算定式の導出とモデル化を行っている。 第 3 章では、CSTS の床に CLT を用いた CSTS 梁部材と CLT 床の接合部性能を把握するための面内せん断実験を行っている。CSTS 梁部材と CLT 床の接合部の接合具にはスタッド、ボルトを用い、長さどピッチを			

パラメータとして用いている。面内せん断実験によると、木質材料の割裂破壊が生じておらず、スタッド、ボルトが曲げ降伏する。それに伴い、CSTS 梁部材のスタッド、ボルトの直上部および CLT 床のスタッド、ボルトの直下部の木質材料部分の支圧破壊となることを示している。接合部の降伏せん断耐力はスタッドの設置間隔よりもスタッドの長さが大きくなるに連れて増加する。CSTS 梁部材と CLT 床の接合部の降伏せん断耐力は接合具に 2 個の塑性ヒンジを有する場合には、ヨーロッパ型降伏理論と概ね合致していることを示している。また、CLT 床どうしを接合する場合には、一般的に長ビスの面内せん断実験により、設計に必要な特性値を示している。

第 4 章では、損傷制御構造の設計概念を基本的な枠組みとした設計フローに沿って、2 章および 3 章で行った実験結果をもとに、設計法を提示している。梁・柱部材の実験から曲げ耐力においては鋼材が降伏した時を CSTS 部材の降伏耐力とし、鋼材と木質材料の曲げ耐力の足し合わせにより評価している。降伏耐力と最大曲げ耐力を結んだ線を二次剛性とし、木質材料の破壊よりも先に鋼が降伏するための条件式を示している。せん断耐力においては、鋼と木質材料のせん断力の足し合わせにより評価する。圧縮力については、短柱圧縮実験の結果から、鋼材と木質材料のヤング係数比に応じて応力を負担するものとしている。

柱梁接合部の実験結果を踏まえ、木質材料どうしの応力の伝達は無いものとし、CSTS 梁部材の端部は半剛接合とし、鋼材のみの回転バネを設けたモデルを用いる。

CLT 床を用いた水平構面については、CSTS 梁と CLT 床の接合部の面内せん断実験の結果から、ボルトを用いた場合の必要なピッチは 200mm を最大間隔、ボルトの長さ 100mm を最小長さとする。水平構面の評価方法は、CLT 告示に倣い、地震力を負担している各鉛直構面、座屈拘束ブレースを用いた鉛直構面どうしの水平せん断耐力の差分を伝達できる面内せん断耐力を有するように設計する。同様に、CLT 床どうしの接合部分が梁上以外の部分で生じた場合には、長ビスまたはラグスクリューボルトを用いるものとし、各接合具のせん断耐力の和が座屈拘束ブレースを用いた鉛直構面どうしの水平せん断耐力の差分よりも大きくなるように設計する。

これらの設計法に基づき、座屈拘束方杖ブレースを有する 10 層 5 スパンの中層建物の時刻歴応答解析を行い、半剛接合の柱梁接合部のもとで、主架構を弾性域に抑え、座屈拘束ブレースのみが塑性化することを検証している。なお、座屈拘束ブレースは、鋼モルタル板（溝形鋼にモルタルを充填したもの）を用いた制振ブレースである。

第 5 章では上述した研究成果をまとめ、その研究展開の可能性に言及することで総括としている。

【公聴会における主な質問内容】

(1) 研究成果の実際の建物への適用にあたっての展望について、(2) 構造実験における木質材料のばらつきと試験体数の関係、鋼に木質材料を組み込む際の寸法精度、木質材料の含水率について、(3) 試設計における半剛接合の考え方、実験に用いた試験体と実際の建物への適用した場合の相違、(4) 剛床仮定に基づく床の面内応力計算法 などに対する質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より、本研究は実用性、創造性、有効性、信頼性ともに優れ、博士(工学)の学位論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格と判定した。

関連論文の発表状況（他 プロシーディング 3 編）

- 1) 大越友樹, 藤田正則, 村井正敏, 岩田衛: 鋼木質複合梁部材の曲げ実験, 日本建築学会技術報告集, 第 19 巻, 第 43 号, pp. 967-970, 2014 年 9 月
- 2) 大越友樹, 藤田正則, 小田大貴, 岩田衛: 座屈拘束方杖ブレースを有する鋼木質複合構造の設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 700 号, pp. 847-855, 2015 年 6 月
- 3) 藤田正則, 大瀧麻世, 大越友樹, 菊池剛和, 小谷野一尚, 岩田衛: 鋼木質複合システムに適合する CLT 床接合部の面内せん断実験, 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 56 号, pp. 189-193, 2018 年 2 月